

力表示器「Fi-Cube」を活用した、中高での授業実践[†]

南 伸昌*・渡邊 剛士*・伊東 明彦*
宇都宮大学教育学部*

我々は近年、「力」の概念理解を助ける教材「Fi-Cube」(Force Indicator Cube)を活用した授業実践を、中学校や高等学校において特別授業の形で行ってきた。今年度は、通常の授業におけるFi-Cubeの活用法を探ることを目的として、単元の中の一つの実験について、事前予測と事後の振り返り活動を取り入れた実践を行った。それにより、指導側の意識と受講生の理解とのズレがあぶり出され、現場の授業における活用の仕方を改善することができた。

キーワード: 教材開発、授業研究、素朴概念、力、Fi-Cube

1. はじめに

物体に力が働くことにより物体の運動は変化する。その様子を科学的に記述したものが力学である。「力」は本来、科学的に定義された用語であるが、日常的にも「エネルギー」や「運動量」の意味を含んだ用語として用いられている。それが素朴概念として正しい「力」の理解の妨げとなっており、代表的なものとして、「運動する物体にはその運動方向に力が働く」というMIF概念(“Motion Implies a Force” preconception)がある。¹⁾

この問題は、理科教育において何十年来の課題であるが、一向に初学者の「力」に対する認識は改まらない。この大きな理由として、力の抽象性が挙げられる。力は、その大きさや向きを目で見て確認することができないので、いくら図(矢印)を用いて力を表現したとしても、それを実際に働く力として実感することが難しく、強固な素朴概念から脱却することが困難になっているのである。

伊東ら^{2),3)}は、子どもが力を理解するためにはその可視化が不可欠と考え、加速度センサーを利用した力表示器「Fi-Cube: Force Indicator Cube」を開発した。そして、Fi-Cubeを活用して中学校や高等学校、そして大学の力学の初学者向けの実験講座を行い、力の認識に大きな改善が見られることを示した。⁴⁾Fi-Cubeの効果的な活用法検討のため、渡邊ら⁵⁾は概念地図法を用いて慣性の法則の理解がどのよ

うに変化するのか調査し、南ら⁶⁾はMIF概念を打破するための授業検討を行ってきた。何れの場合も力の認識に大きな改善が見られたが、授業は基本的に複数のティーチングアシスタント(TA)を配置して、4~8人の小グループを一人のTAがつきつきりで面倒を見るという形で行われた。また、時間も90~120分で、それほど厳しい制限は無かった。

TAを活用して手厚く指導すれば生徒の理解が深まるのはある意味当然のことで、しかも時間配分を自由に使える長時間の特別授業は、通常の1校時50分という制限がある授業とは趣を大きく異にする。そこで本研究では、一人の教員が全体の流れを支配し、TAはあくまでも補助に徹する形の授業を検討した。また、通常の50分という授業時間の中でFi-Cubeを有効に活用するために、一つの実験+その予想・振り返りをコンテンツとして捉え、通常の授業時間の中で活用できるコンテンツの構築を図った。

2. 授業実践

2-1. 事前/事後調査

授業前の生徒の理解状況を知り、Fi-Cubeの効果性を評価するために、授業実施の10日ほど前に、図1に示すような調査を行った。調査項目は「水平面上で運動している物体」、「斜面上で運動している物体」、「鉛直方向に運動している物体」に働く力を、運動の状況に応じて矢印で正しく表現できるかどうかを問うものである。

[†] Nobumasa MINAMI*, Tsuyoshi WATANABE* and Akihiko ITO*: Practicing Classes using the force Indicator Unit “Fi-Cube” in a junior high school and a high school.

* Faculty of Education, Utsunomiya University

SPP 高大連携科学実験講座 「力と運動」事前調査票 (1年) 平成21年10月

組 _____ 氏名 _____

◇地球上において、以下の物体に働く力を矢印で示さない。力のおおよその大きさは、矢印の長さで表します。図中、点線の矢印は物体の進行方向を表しています。

1. 水平な台の上に静止した物体。 2. 摩擦のある斜面上に静止した物体。

3. 摩擦のない斜面を滑り落ちる物体。 4. 摩擦のない斜面上方に押し出された物体。

5. 自由落下している物体。 6. 鉛直上方に投げ上げられた物体。

7. 摩擦のない水平面上を、右に向かって等速で進んでいる物体。

8. 摩擦のない水平面上を、右に向かって速度を上げながら進んでいる物体。

9. 摩擦のない水平面上を、右に向かって速度を落としながら進んでいる物体。

◇摩擦のない水平面上で、一定の力で物体を押している場合、その物体の速度はどのようなになるのか、次の選択肢に○をつけなさい。

どんどん速くなる / 始めは増加するがそのうち一定に / ずっと一定

図1 事前調査

「水平面上で運動している物体」に関する設問は1、7、8、9と◇、「斜面上で運動している物体」に関する設問は2、3、4、「鉛直方向に運動して

いる物体」に関する設問は5、6である。1～9はそれぞれ、1 平面・静止、2 斜面・静止、3 斜面・下向、4 斜面・上向、5 落下・下向、6 落下・上向、7 平面・等速、8 平面・加速、9 平面・減速、のように略記して正答率を整理した。

事後調査は事前調査と同じ内容だが形式が異なる調査用紙を作成して用いた。事後調査は、授業実施後2週間程度で実施し、事前調査の結果と比較することにより、授業の前後で生徒たちの認識がどのように変化したのかを調べた。

2-2. 授業内容

2-2-1. Fi-cube の説明

授業は、テキスト、ワークシートに従い、基本的に事前調査用紙の内容を確認する形で進めた。事前調査用紙も各個人に返却し、その内容を確認する形で授業を進めることを伝えた。それから、Fi-Cube (図2) の説明を行った。

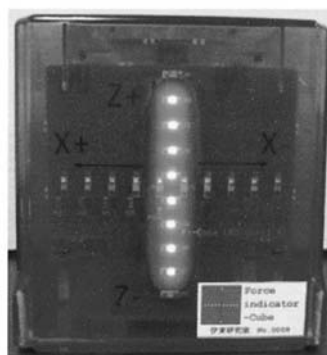


図2 Fi-Cube

Fi-Cube は加速度センサーを内蔵しており、その出力を、LED が点灯する向きとその数に反映させ、どの方向にどのくらいの大きさの力が働いているのかということを表示する。¹⁾ 力の大きさは、Fi-Cube に働く重力を4つ分の点灯で表し、あとは作用する力の大きさに応じて点灯する数が変わるように設定されている。

まず生徒に、静地したまま Fi-Cube のスイッチを入れた。そして、「力が作用した方向に、その力の大きさに対応した数の LED が点灯する」ことを伝え、設問1を意識させながら現在点灯している LED がどんな力を表しているのか考えさせた。

ただ、上下 (Z 軸方向の±) に照って点灯してい

る各4つのLEDを見て、「これが重力と垂直抗力です」といわれても、なかなか実感が湧かない。そこでFi-Cubeを、Y軸を中心にして90度回転させた。そうすると、回転角に応じて、LEDの点灯がX軸方向とZ軸方向とに分解され、90度回転させるとX軸方向の土に点灯が切り替わる。これにより、LEDの点灯が力を表しているという実感が強くなるようであった。

2-2-2. 鉛直方向の運動

教授の際に重要なのは、教材でも教師でも生徒からの信頼感である。いくらFi-Cubeで力が目に見えるようになっても、生徒の方がその表示を理解・信頼し、力を実感できなければ意味が無い。そこで、Fi-Cubeに対する信頼感を確かなものにし、かつ、MIF概念を打ち砕く第一歩として、自由落下と鉛直投げ上げの実験を行った。

実験は、設問5と6を見直してから行った。自由落下開始と同時に上向きのLEDが消える。これを見て一緒にFi-CubeのLEDは飾りではなく、実際の運動（の変化）に対応していることが実感できたようであった。そして、投げ上げの際も上向きのLEDが消え、下向きのみが点灯していることを観察させ、進行方向と力の働く向きとが一致しないことを示し、MIF概念打破の第一歩とした。ただし、Fi-Cubeの表示を見て、その意味するところを直ちに理解できない生徒もいたので、生徒の実感に沿うような説明を試みた。これにより、自分たちが学習してきたこと一手を離れた物体に働く力は（空気抵抗を考えなければ）重力のみを理解することができてきたようであった。

2-2-3. 水平面上の「等速度」運動

設問7を見直したあと、Fi-Cubeを軽量台車の上に乗せて、平らな机の上を走らせた。台車を走らせる前は重力と垂直抗力のみが表示されている。台車を押すと、進行方向のLEDが点灯するが直ぐに消え、台車を止めると進行方向と逆方向のLEDが点灯し、止まると消える。その間、上下のLEDは点灯したままでも数も変わらない。この辺りになると受講生は、「等速度運動の最中は物体にかかる力は重力と垂直抗力だけだ」ということを「目で見て確認している」ということが実感でき始めるようであった。

ここで、押すときと止めるときとのLEDの点灯に

着目させた。押すとき、止めるときは共に台車に力が作用している。そして、その際には速度を持ったり無くしたりする、すなわち速度の変化がある。このことから「力の作用」と「速度の変化」との間に関係があることを意識させ、等加速度運動（加速／減速）の実験へ移った。

2-2-4. 水平面上の「等加速度（加速／減速）」運動

設問8と設問の◇とを見直したあと、水平面上の等加速度運動（加速）の実験を行った。この実験は、二つのやり方を試した。一つはFi-Cubeを載せた台車にバネはかりを接続し、はかりの指示が一定になるように引っ張る方法である。これは従来からやられていた方法であるが、Fi-Cubeの最低感度が重力加速度の4分の1と大きいことから、一定の力でLEDを点灯させて引っ張ること自体が難しく、机上で急速に加速する台車の運動からは「だんだん速くなる」というイメージを得ることも難しいようであった。もう一つは、糸をつけたおもりを自由落下させ、糸を滑車に通じて引っ張る方向を水平方向に変換して台車を引っ張る生徒実験である。前半のA中学校の実践では前者の方法を、後半のB高等学校での実験では後者の方法を採用した。

水平面上での減速は、Fi-Cubeを直接机の上で滑らせ、その間に働く動摩擦力を利用して実験を行った。この摩擦力が、大抵の机の上ではLED一個分の点灯となるので、実験としてはやり易いものであった。

2-2-5. 斜面上の運動

当初は斜面上の運動についても同様に、事前調査の結果と比較しながら実験を行い、理解を深める予定であった。しかし、生徒との対話を重視した結果、今回の授業実践では時間が足りなくなったので、生徒実験としては行わないことにした。A中学校とB高等学校の2年生には演示で行い、B高等学校の1年生の授業からは省いたが、調査用紙ではそのまま斜面上での運動についても問いかけ、水平面上で学習したことがどの程度応用できるのかということを経験程度に見る資料とした。

3. 結果

3-1. A中学校

A 中学校においては通常の授業時間で、一人の教員による授業を試みた。ただし、Fi-Cube が馴染みの無い教材ということを考え、TAを一名配置して生徒の学習に支障が出ないように補助できる体制で行った。授業は3クラスのべ98名に対して行った。

A 中学校における事前調査と事後調査との比較のグラフを図3に示す。なお、これ以降のグラフでは、横軸に項目を、縦軸に正答率を表す。

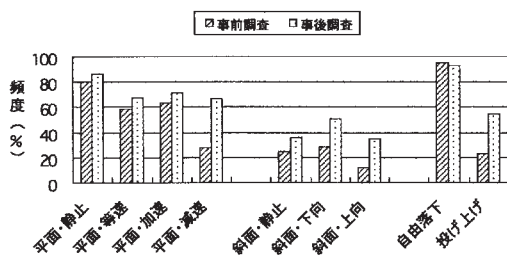


図3 A 中学校の事前／事後調査結果比較

事前調査において、平面・静止、自由落下（落下・下向）は80%以上の正答率を得ることができた。また、平面・等速、平面・加速も正答率は60%程度で、中学校の力学分野学習済みとはいえ生徒の優秀さを物語っている。しかし、平面・減速、斜面・静止、斜面・下向、斜面・上向、投げ上げ（落下・上向）に関しては、軒並み30%以下となり、正しい認識を持てていないことが判る。これらのうち平面・減速、斜面・上向、投げ上げは、正にMIF概念の影響が大きいところで、このような優秀な生徒たちにして根強い素朴概念の影響が見て取れる。

事後調査ではほとんどの項目の正答率が上昇していたが、中でも平面・減速、斜面・上向、投げ上げの3つは2-3倍と著しい伸びを示していた。このことは、MIF概念打破にFi-Cubeが有効に機能したことを示している。

ただ、平面・等速や平面・加速といった初めの正答率がある程度高い項目は、事後においてさほどの伸びを示さなかった。A 中学校では平面・加速の実験に、バネばかりによる台車の牽引を採用したが、前述したように中学生がうまく実験することは難しいようであった。また、2 m 弱の机の上で加速した場合、「あっという間に速くなって、一定速度になった」という印象が強いことが口頭でのやり取りや調査用紙の結果から判った。

以上のことから、Fi-Cube の活用により、通常の形式の授業においてもMIF概念を打ち崩すことが可能であることが判った。しかし、一定の力での加速の方法など課題も見つかったので、改善策を講じ、次の実践に備えた。

3-2. B 高等学校2年生

B 高等学校では実際の授業での展開を念頭において、一つの実験の前後の活動を充実させた。具体的実験の前にワークシートを用いて、それぞれ動の際の力の矢印の向きを班で議論して予想さ。そして、Fi-Cube で実際に表示された力が、当にそれで正しいのか」という疑問を投げかけ、議論して納得して次へ進むように指導した。そのめ、現場の状況とは少々異なるが、生徒4-8名Aを一人つけ、指導の充実を図った。

前調査と事後調査との比較のグラフを図4に示す。力学を履修した2年生は全体的に正答率が高い。水平・静止、落下・下向、平面・等速は80%以上の正答率で、平面・加速、斜面・静止、斜面・下向、落下・上向は60%以上の正答率である。A 中学校では20%程度であった落下・上向の正答率の高さが目につく。これは、高等学校での学習の成果と考えられる。しかし、平面・減速、斜面・上向といった、運動の方向と力の向きが異なる運動の場合は、半分以上の生徒が誤った認識を持っていた。やはり、この段階においてもMIF概念の影響が大きいことが判る。図には載せていないが、等加速度運動での速さの変化について問うた最後の問題の正答率は約60%で、平面・加速とほぼ同じであった。

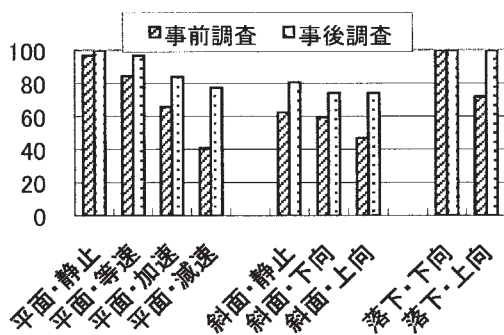


図4 B 高等学校2年生の事前／事後調査結果比較

事後調査の結果を見ると、事前調査と比べて全体

的に正答率は上がっているが、中でも MIF 概念に係る、平面・減速、斜面・上向、落下・上向の三つが大きな伸びを示している。このことから、Fi-Cube を用いた授業による MIF 打破の有効性がよく判る。

今回は、平面・加速に関する実験に滑車を用いるなどの工夫を取り入れた。この設問の正答率は、授業の前後で 60 %から 80 %程度伸びており、設問◇で一定の力で物体を引っ張ったとき、その速さがどんどん速くなると回答した生徒の割合も同程度であった。この数値は、以前、バネばかりを用いて行った授業実践のものとはほぼ同じであった。⁴⁾ただ、実験の際の生徒の反応は、バネばかりの場合は「速さの変化はよく判らない。」であったが、滑車を用いたものは「速くなっている！」であった。今回の結果から、力学学習者に対する学習効果には両者とも差は見られなかったが、生徒の反応から、滑車を用いた装置を 1 年生の実践で用いることとした。

3-3. B 高等学校 1 年生

事前調査と事後調査との比較のグラフを図 5 に示す。事前調査では 2 年生と同様に、水平・静止、落下・下向、平面・等速は 80 %以上の正答率である。しかし、斜面・下向は 50 %程度、平面・加速、平面・減速、斜面・静止、落下・上向の正答率は 30-40 %、斜面・上向に至っては 10 %程度と、やはり、力学履修前の 1 年生は、どちらかといえば中学 3 年生に近いレベルであることが判る。平面、斜面、落下の中では、何れも MIF 概念に係る平面・減速、斜面・上向、落下・上向の正答率が一番低いことは、この学年でも同様であった。

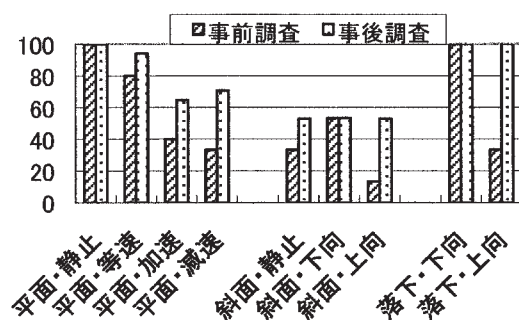


図 5 B 高等学校 1 年生の事前／事後調査結果比較

事後調査の結果で、著しい伸びを示しているのが、MIF 概念に関連する平面・減速、斜面・上向、落下・上向である。初めの正答率が低いせいもあるが、それぞれ 2-3 倍の伸びを示し、落下・上向に至っては正答率が 100 %となっている。以上のことから、ここでも Fi-Cube を用いた授業が MIF を打破するのに有効であることがよく判った。

図には示していないが、一定の力で物体を引っ張った場合、その速さがどんどん速くなると回答した生徒の割合は、事前の 60 %から 95 %にまで上がっていた。このことは、力学未学習者にとっては、滑車を用いた加速装置による実験の方がバネばかりを用いたものよりも運動の変化が判り易かったことを示している。力学を一通り学習した生徒にとっては、滑車だろうがバネはかりだろうが、実際の力の作用を「目にする」効果だけで十分であるが、初学者にとっては提示の仕方が学習効果を大きく作用することの表れだと考えられる。

4. 考察とまとめ

力表示器「Fi-Cube」の効果を確認できた結果となったが、今回の授業では Fi-Cube で力の矢印を見ただけでは「納得」できない生徒の存在にも気づくことができた。今までは、「見れば判るだろう」程度の認識で授業を行ってきた感があり、また、授業内容を詰め込んでいたせいもあり、TAなどが丁寧に（一方的に）説明して授業を進めてきた。今回、高等学校において、実験の前後に生徒どうして議論し合う時間を設けたことにより、初めてそういった生徒の存在に気づくことができた。

具体的には、落下・上向の実験で、Fi-Cube の上向きの LED が消えたことに納得できない生徒がいた。力には、物体に接している物体から働くものと、離れていて働くものと 2 種類がある。手を離れたあとの物体には、空気抵抗を無視すると、接して働く力はなく、離れて働く力は重力のみである。今回は授業者が生徒の疑問を捉え、クラス全体に対して臨機応変にそのような説明を行ったことにより理解を深めることができた。

どのような実験であれ結果が見えた後が重要で、「どうしてそうならなければならないのか」ということをきちんと授業者が説明できないと、すぐに素朴概念に塗り直されてしまう。しかも、生徒ごとに表現は微妙に異なるので、時間的にゆとりを持った

授業計画を立てなければ納得のできる説明は覚束ない。今回、高等学校の、特に1年生の授業においては計画段階からそのようなゆとりを持って授業を行ったため、事前／事後の伸びが大きくなったと考えられる。以上のようなことが判り、それを実践に反映できたことが、本研究の最大の収穫であるといえる。

ところで、Fi-Cube で見た力が実験室で使う教材以外の運動でも同じように「見えて」こなければ「力」を本当に理解したとはいえない。これは、一般的には日常知と科学知の間の擦り合わせの問題である。⁷⁾科学知は、学校などでのみ適用可能な知として捉えられ、日常の出来事を理解するのに使われる日常知とは一線を画したものとして認識されている。理科のみならず、学校での学習の一つの目標はこの科学知と日常知との止揚であるともいえ、これ無しには理解が定着することなく、時間が経つと容易く MIF などの素朴概念に塗り替えられてしまう。

そこで、高等学校における授業では、授業のまとめとして消しゴムを放り投げ、「今空中で運動している消しゴムにも、日には見えないけど Fi-Cube で見たのと同じように力が働いている。そして、力が働くから上に投げたものが頂点で進行方向を変えて下に向かって加速して（落ちて）くるんだ。」ということを強調し、身の回りの力学現象すべてについて矢印をイメージして捉えられるように指導した。最後に提出用シートに記述してもらった、班ごとのコメント等の抜粋を示すが、これを見るとこの言葉掛けを含め、力の概念が授業者の狙い通りに印象づけられていることがうかがえる。

提出用シートのコメント

本時で学んだこと、認識を新たにしたこと

- ・進行方向と同じ向きに力を加えると速くなり、進行方向と反対向きに力を加えると遅くなる。
- ・物体を落としたとき、そこには力が働いていて、力の大きさは変わらないのに加速するというのが発見だった。
- ・普段、消しゴムが落ちるなどということに何も感じなかったが、そういう何気ないことにも、ルールや法則（？）というものがあるのだと思った。これから、動いている物体を見る目が変わりそうだ。

- ・物体が止まるのにも動くのにも何らかの理由がある。
- ・進行方向と力の向きは関係ない。
- ・見えない“力”というものを Fi-Cube で見ることで働いている力が分かった。
- ・力学の基礎となるものがあやふやだったが授業を通して分かった。

授業の中で、興味深かった点、意外だった点

- ・物体が動いている向きと働く向きが関係ないことに驚いた。
- ・投げ上げのとき、重力しか働かなかったのが驚いた。
- ・重力は全ての物体に働くこと。
- ・水平方向に力が加わっていないのに等速直線運動をするというのに驚いた。
- ・斜面上で静止しているときも重力の水平方向の成分が働いていること。
- ・Fi-Cube の仕組みが気になった。

この授業に対する要望、コメント、感想

- ・ものを落としたり、投げたりするような身近なことにさまざまな力がいろんな向きで働いて、面白いと思った。これからは、いろんな見方でものごとを見ていこうと思った。
- ・物理というのは、計算が多く、小数点の多い数字がでてきて難しそうというイメージが強かったが、今日の授業を通して日常の不思議なことが解明できるおもしろい面もあるのだなあと思った。
- ・普段見ることができない力を見ることができたので、「なんとなく理解」から「はっきり理解」に変わった。普段の授業より分かりやすく、納得もできた。
- ・曖昧だった力学に関する知識を明確にすることができた。
- ・Fi-Cube が欲しくなった。

その他

- ・物理はあまり好きではなかったが、授業を受けてみて物理が好きになった。これからはもっと身の回りの現象になどにも関心をもって生活していきたいと思った。
- ・とても楽しかった。遊び感覚でムズカシイことも考えることができた。また参加したい。もっとこういう機会がほしい。わたしは、文系を考えていたが、理系も楽しいんだって思った。
- ・いつもは見えない力が見えることによって、普段

の生活でも力について考えるようになった。とても楽しかった。

- ・ “目に見えない力”をまさか目で見られるなんて思ってもいなかったのも、強烈だった。あいまいだった力学の分野をイメージと一緒に理解できた。
- ・ 物理は、ただ難しいだけだと思っていましたが、今回参加して物理は理解すれば、とても楽しい教科だということがわかりました。

謝辞

授業実践にご協力戴きました、宇都宮東高等学校附属中学校の関栄二先生及び栃木女子高等学校の吉柴豪直先生に深く感謝の意を表します。また、資料整理等を手伝っていただいた立花由美さんに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Clement, J., Students' preconceptions in introductory mechanics, Am. J. Phys., Vol. 50, No. 1, pp. 66-71, 1982.
- 2) 渡辺一博・伊東明彦, 「力表示器」を用いた中学生の力概念の育成を目指した授業実践, 日本理科教育学会全講大会発表論文集, 6, 256, 2008.
- 3) 伊東明彦, 渡辺一博, 「力の学習を支援する力表示器「Fi-Cube」の製作と授業実践」, 宇都宮大学教育学部紀要, 第 59 号, pp. 13-26, 2009.
- 4) 渡辺一博, 「理科教育における力概念の形成をめざした実践的研究-力表示器「Fi-Cube」の開発と授業実践-」, 平成 20 年度宇都宮大学大学院教育学研究科修士論文(伊東研究室), 2009.
- 5) 渡邊剛士, 「概念地図を用いた生徒の力学概念の変容に関する研究-力表示器「Fi-Cube」の効果の検証-」 平成 21 年度宇都宮大学大学院教育学研究科修士論文(伊東研究室), 2010.
- 6) 南伸昌, 渡邊剛士, 渡辺一博, 立花由美, 伊東明彦, 「力表示器「Fi-Cube」の開発と、中高における授業実践」, 平成 21 年度科学教育研究協議会全国研究大会埼玉大会物理分科会報告, 2009.
- 7) 奈良由美子, 伊勢田哲治著, 「科学知と生活知」, 放送大学教育振興会, 2009.

